



Evaluation of Damage in Composite Laminated Sheets with Circular Defects under Tensile Loading Using Digital Image Correlation Method

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Pakravan M.¹ BSc,
Farahani M.*¹ PhD

How to cite this article

Pakravan M, Farahani M. Evaluation of Damage in Composite Laminated Sheets with Circular Defects under Tensile Loading Using Digital Image Correlation Method. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(4):1025-1031.

¹Mechanical Engineering Faculty, Colleges of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Colleges of Engineering, University of Tehran, North Kargar Street, Tehran, Iran
Phone: +98 (21) 88353893
Fax: -
mrfarahani@ut.ac.ir

Article History

Received: May 11, 2019

Accepted: September 29, 2019

ePublished: April 17, 2020

ABSTRACT

Nowadays, the use of a non-contact digital imaging system for non-destructive testing on composite materials has received much attention because of its advantages. In this research, the shape, position and area of the breakdown region in glass/epoxy samples with blind holes and different depths under tensile loading have been investigated using a non-contact digital imaging system. Specimens with a 10 mm diameter blind, depths of 0.5, 1 and 1.5 mm, and an average thickness of 4 mm have been subjected to the tensile loading. Lateral strain contours for all three samples have been obtained at different loads. By increasing the lateral strain loading, it focuses on an area on the surface of each specimen that corresponds to the position of the blind hole. Then the lateral strain is measured separately in length and width for each specimen. Increasing the amount of loading and the depth of the breakdown have resulted in greater strain concentration in the breakdown area as well as increasing the accuracy of the digital images correlation system. The position, shape, area, and diameter of the blind hole measured by digital image correlation method have been compared with real values, which considering the acceptable consistency of the results of the digital image correlation method with the features of each sample, It can be used as an efficient method for detecting and evaluating failures in composite structures.

Keywords Nondestructive Test; Digital Image Correlation; Composite Laminate; Blind Hole

CITATION LINKS

[1] Evaluation of the elastic and plastic properties of aluminum sheet produced by climbing bonding process by digital image correlation method [2] Numerical and experimental investigation of defect detection in polymer materials by means of digital shearography with thermal loading [3] Characterizing the elastic and plastic properties of the multilayered Al/Brass composite produced by ARB using DIC [4] Impedance analysis for condition monitoring of single lap CNT-epoxy adhesive joint [5] Defect evaluation of the honeycomb structures formed during the drilling process [6] Characterization of cohesive model and bridging laws in mode I and II fracture in nano composite laminates [7] Experimental study of the residual stresses in girth weld of natural gas transmission pipeline [8] MWCNT-epoxy nanocomposite sensors for structural health monitoring [9] Determination of damage evolution in CFRP subjected to cyclic loading using DIC [10] Correlation between full-field measurements and numerical simulation results for multiple delamination composite specimens in bending [11] Damage detection in composite materials using deflectometry, a full-field slope measurement technique [12] Digital image correlation(DIC) for measurement of strains and displacements in coarse, low volume-fraction FRP composites used in civilinfrastructure [13] On the use of acoustic emission and digital image correlation for welded joints damage characterization [14] Determination of the properties of composite materials thanks to digital image correlation measurements [15] Damage monitoring and analysis of composite laminates with an open hole and adhesively bonded repairs using digital image correlation [16] Strength degradation and stress analysis of composite plates with circular,square and rectangular notches using digital image correlation [17] Feasibility of digital image correlation for railroad tie inspection and ballast support assessment [18] Detection of delamination in polymer composites by digital image correlation-experimental test [19] Determination of local constitutive properties of aluminum using digital image correlation: A comparative study between uniform stress and virtual fields [20] Using digital image correlation for characterizing the elastic and plastic parameters of ultrafine-grained Al 1050 strips fabricated via accumulative roll bonding process

ارزیابی خرابی در ورق‌های چند لایه کامپوزیتی دارای آسیب دایروی تحت بارگذاری کششی با روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال

محمدجواد پاکروان BSc

دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

محمدرضا فراهانی PhD*

دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

امروزه استفاده از سیستم غیرتماسی برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال برای عیب‌یابی کامپوزیت‌ها به دلیل مزایای آن مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش با استفاده از روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال شکل، موقعیت و مساحت ناحیه خرابی در نمونه‌های شیشه/اپوکسی دارای سوراخ کور با عمق‌های متفاوت تحت بارگذاری کششی بررسی شده است. نمونه‌های دارای سوراخ کور با قطر ۰/۵ میلی‌متر به عمق‌های ۱ و ۱/۵ میلی‌متر و ضخامت میانگین ۴ میلی‌متر تحت بارگذاری کششی قرار گرفته است. کانتورهای کرنش جانبی برای هر سه نمونه در بارگذاری‌های مختلف به دست آورده شده است. با افزایش بارگذاری کرنش جانبی در ناحیه‌ای در سطح هر نمونه متمرکز شده است که با موقعیت سوراخ کور مطابقت دارد. سپس کرنش جانبی در راستای طول و عرض برای هر نمونه به‌طور جداگانه اندازه‌گیری شده است. افزایش مقدار بارگذاری و عمق خرابی موجب تمرکز کرنش بیشتر در ناحیه خرابی و همچنین افزایش دقت سیستم برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی شده است. موقعیت، شکل، مساحت و قطر سوراخ کور اندازه‌گیری شده توسط روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی با مقادیر واقعی مقایسه شده است که با توجه به تطابق قابل قبول نتایج حاصل از روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال با ویژگی‌های مربوط به هر نمونه می‌توان این روش را به‌عنوان یک روش کارآمد در تشخیص و ارزیابی خرابی‌ها در سازه‌های کامپوزیتی استفاده نمود.

کلیدواژه‌ها: آزمون غیرمخرب، برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال، ورق کامپوزیتی، سوراخ کور

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۲/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۰۷

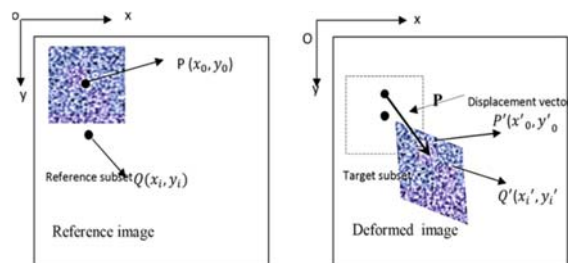
*نویسنده مسئول: mrfarahani@ut.ac.ir

۱- مقدمه

با وجود کاربرد فراوان و رو به رشد مواد کامپوزیتی در مصارف گوناگون صنعتی، سازه‌های کامپوزیتی بالاخص در صنایع مهم و حساس نظیر هوافضا و سازه‌های عمرانی باید کاملاً تحت بازرسی باشند. هرچند سازه‌های کامپوزیتی مزایای فراوانی دارند، لیکن هنگام رخداد خرابی، تقریباً بدون نشانه و هشدار خاصی، به شکل فاجعه‌آمیزی دچار شکست می‌شوند. آسیب‌های ناشی از برخورد اجسام که منجر به خرابی‌هایی از نوع شکاف یا سوراخ می‌شوند و همچنین سوراخ‌کاری جهت اسمبل کردن گونه‌ای از عیوب در مواد کامپوزیتی است که در صورت عدم انجام اقدامات موثر در حوزه تعمیرات و نگهداری، در سازه آسیب‌دیده گسترش یافته و می‌تواند

به ازمه‌گسیختگی کامل سازه کامپوزیتی منجر شود^[1]. نظر به محدودیت‌های موجود در اجرای روش‌های معمول ارزیابی غیرمخرب، از قبیل عدم کارایی مناسب در شناسایی برخی عیوب به‌خصوص در مواد کامپوزیتی به‌دلیل ساختار پیچیده و غیرهمسانگرد، نیاز به روش‌های نوین بیش از پیش احساس می‌شود. به‌عنوان مثال لزوم امکان دسترسی مستقیم به ناحیه تحت بازرسی در روش‌های ارزیابی غیرمخرب و از آنجا که این امر تنها در زمان انجام عملیات نگهداری و تعمیرات با خارج شدن سازه از حالت عملیاتی امکان‌پذیر است، انجام بازرسی‌های مداوم و مستمر، مبتنی بر آزمون‌های غیرمخرب متداول از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه نخواهد بود^[2]. توسعه دوربین‌های دیجیتال پیچیده و تکنیک‌های پردازش تصویر، فناوری جدید اندازه‌گیری غیرتماسی به نام برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال را بسیار توانمند ساخته است. این تکنیک روشی برای اندازه‌گیری تغییر شکل به‌صورت پیوسته است که قادر است مواد را تحت بارگذاری حرارتی، مکانیکی تحلیل کند^[3]. این روش در بسیاری از زمینه‌ها مانند مهندسی عمران^[4] مهندسی مکانیک^[5] علم مواد^[6,7] و بیومکانیک^[8] کاربردی شده است. این روش عکس‌های گرفته‌شده حین تست از نمونه را تحلیل می‌کند تا میزان جابجایی نمونه را اندازه‌گیری کند. وقتی جابجایی نقاط مختلف در نمونه مشخص شد، امکان محاسبه کرنش، چرخش، برش یا هر تغییر شکل مرتبطی که کاربر در نظر دارد، میسر می‌شود. از میان روش‌های مختلف طراحی و پیاده‌سازی سامانه‌های مبتنی بر بازرسی، استفاده از روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال در سال‌های اخیر به‌خصوص در بازرسی سازه‌های کامپوزیتی، رشد چشمگیری داشته است. به‌طور خاص، با نظارت کامل سطح توسط روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال می‌توان توزیع کرنش را در سطح نمونه اندازه‌گیری کرد. در دهه گذشته، بسیاری از محققان برای اندازه‌گیری جابجایی سطح و کرنش و مطالعه مکانیزم تغییر شکل از روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال استفاده کرده‌اند. ون و همکاران^[9]، پیشنهاد روش محلی‌سازی حداقل مربعات برای به‌دست‌آوردن میدان کرنش قابل اعتماد پیشنهاد داد که در آن شرایط مرزی ناحیه سوراخ و منطقه ترک مورد بحث قرار گرفت. دیویور و همکاران^[10, 11]، تمرکز کرنش ناشی از دیلمینیشن مصنوعی و نقص فرآیند را از طریق برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال شناسایی کرد. کاستیلو و همکاران^[12]، امکان استفاده از روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال را برای اندازه‌گیری میدان‌های کرنش روی مواد پلیمری تقویت‌شده با فیبر مورد بررسی قرار دادند و مزیت‌ها و میزان خطا را با روش‌های قدیمی‌تر مقایسه کردند. علاوه بر این، برخی از محققان دیگر از این روش برای بررسی عملکرد مواد از طریق تغییر شکل استفاده کردند. شارما و همکاران^[13]، به‌منظور بررسی خصوصیات آسیب خستگی در صفحات فلزی جوش‌خورده از روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال برای مشاهده هندسه ترک و تایید نتایج انتشار صوت استفاده کردند. لورین و همکاران^[14]، از

بعدی نیز بر اساس تطابق میزان شدت نور خاکستری است. این ناحیه دارای یک توزیع منحصربه‌فرد از شدت نور است که بعد از فرآیند تغییر شکل، با یافتن ناحیه‌ای با شدت نور مشابه در تصویر بعد از تغییر شکل، جابجایی زیرمجموعه مذکور پیدا می‌شود. همچنین در این روش برای افزایش رزولوشن اندازه‌گیری مقادیر شدت نور برای هر پیکسل توسط توابع، درون‌یابی می‌شود تا بتوان جابجایی در گستره $0/01$ پیکسل را نیز شناسایی نمود. مطابق شکل ۱، به‌منظور محاسبه جابجایی نقطه نمونه P ، یک محدوده مربعی به نام زیرمجموعه مرجع با ابعاد $(2n + 1) \times (2n + 1)$ پیکسل و به مرکزیت P از تصویر مرجع انتخاب و برای ردگیری موقعیت متناظر آن در تصویر تغییرشکل‌یافته استفاده می‌شود. دلیل انتخاب یک زیرمجموعه مربعی نسبت به یک پیکسل مشخص جهت انطباق، این است که یک زیرمجموعه تنوع وسیعی در سطوح خاکستری دارد که آن را از زیرمجموعه‌های دیگر مجزا می‌کند. بنابراین می‌توان به‌صورت اختصاصی در تصاویر تغییرشکل‌یافته جستجو شود. برای ارزیابی درجه تشابه بین زیرمجموعه مرجع و زیرمجموعه تغییرشکل‌یافته، لازم است یک معیار همبستگی تعیین شود که ضریب همبستگی نامیده می‌شود. هنگامی که اکس‌ترم ضریب همبستگی تعیین شود، موقعیت زیرمجموعه تغییرشکل‌یافته تعیین می‌شود. اختلاف در موقعیت مرکز زیرمجموعه مرجع و مرکز زیرمجموعه هدف منجر به بردار جابجایی P می‌شود [19].



شکل ۱) نمایی از یک زیرمجموعه مربع در اطراف نقطه P در تصویر مرجع و تصویر تغییر شکل

از معادله ۱ به‌عنوان تابع همبستگی برای تطبیق استفاده می‌شود. جابجایی مرکز زیرمجموعه پیکسل‌ها هنگامی که بهترین تطابق شناسایی شد، ثبت می‌شود. میدان‌های کرنش از گرادیان میدان‌های جابجایی با استفاده از یک روش تمایز عددی مطابق با معادلات ۲ و ۳ به‌دست می‌آید [20].

$$C(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_i) - \bar{f}][g(x'_i, y'_i) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [f(x_i, y_i) - \bar{f}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [g(x'_i, y'_i) - \bar{g}]^2}} \quad (1)$$

$$x' = x + u_0 + \frac{\partial u}{\partial x} dx + \frac{\partial u}{\partial y} dy \quad (2)$$

$$y' = y + v_0 + \frac{\partial v}{\partial x} dx + \frac{\partial v}{\partial y} dy \quad (3)$$

در معادلات بالا، $\bar{f}$ متوسط مقدار شدت زیرمجموعه مرجع، $\bar{g}$ متوسط مقدار شدت از زیرمجموعه‌های تغییر شکل، m پهنای زیرمجموعه در پیکسل و u_0 و v_0 تغییر شکل از مرکز زیرمجموعه در جهات x و y است.

اندازه‌گیری میدان کامل با استفاده از برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال برای تجزیه و تحلیل تست‌ها در ساختارهای کامپوزیتی آسیب‌دیده تحت بارگذاری کششی استفاده کرد، صفحات آسیب‌دیده با دیلمینیشن‌های ابتدایی تحت بار فشاری قرار گرفتند. کامینرو و همکاران [15]، از این روش برای نظارت بر کامپوزیت لمینیت‌ها با سوراخ باز استفاده کردند و سپس آسیب و عملکرد تعمیرات پیچ‌چسبیده را تحت بارگذاری کششی بررسی کردند. خجایی و همکاران [16]، تنزل استحکام و تنش را در صفحات کامپوزیتی دارای شکاف‌های دایره‌ای، مربعی و مستطیلی را با استفاده از روش همبستگی تصاویر دیجیتال بررسی و اندازه‌گیری کردند. ساباتو و نیزرکی [17]، امکان‌سنجی روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال را برای بازرسی خطوط ریلی بررسی کردند. سبینی و هیلو [18]، دیلمینیشن در کامپوزیت‌های پلیمری را توسط روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال بررسی کردند. علی‌رغم کاربردهای موفقیت‌آمیز این روش در اندازه‌گیری تغییر شکل سطح، عدم درک ویژگی‌های کرنش در پوسته‌های کامپوزیتی که دارای آسیب سوراخ کور هستند، این مقاله در نظر دارد با استفاده از روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال، شکل، موقعیت و مساحت ناحیه خرابی در نمونه‌های شیشه/اپوکسی دارای سوراخ کور با عمق‌های متفاوت را تحت بارگذاری کششی در ۳۰ و ۴۰٪ بار مورد نیاز برای شکست نمونه سالم و بدون سوراخ کور را بدون تخریب نمونه‌ها شناسایی و ارزیابی کند.

۲- اصول تئوری حاکم بر روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال

اساس کار روش همبستگی تصاویر دیجیتال در حالت دوبعدی، ردگیری و یافتن نقاط یا پیکسل‌های با شدت نور واحد بین دو تصویر ثبت‌شده در قبل و بعد از تغییر شکل است. چون کرنش‌نگاری دیجیتال یک فناوری بر پایه تصویر است، سیستم مختصاتی بر پایه پیکسل مورد استفاده قرار می‌گیرد. از آنجایی که اغلب استفاده از یک پیکسل منفرد برای یافتن نقطه انطباق غیرممکن است، از یک ناحیه با چندین پیکسل استفاده می‌شود تا فرآیند انطباق انجام پذیرد. در این روش، قبل و بعد تغییر شکل از نمونه، عکس گرفته می‌شود و به‌صورت دیجیتال ذخیره می‌شود. به‌منظور مقایسه بهتر، نمونه‌ها با اسپری سفید پوشش داده می‌شوند و بعد از خشک‌شدن، نقاط سیاه‌رنگ به‌صورت تصادفی روی نمونه‌ها ایجاد می‌شود. در اثر تغییر شکل نقطه‌های موجود روی سطح نمونه نیز جابجا می‌شوند. دو عکس از قبل و بعد از تغییر شکل برای مقایسه و همپوشانی مختصات گرفته می‌شود. سپس با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر و ارتباط بین عکس‌ها، جابجایی‌ها و مشتقات آنها به‌دست می‌آید. تابع همبستگی تصاویر دیجیتال به‌صورت ردگیری موقعیت الگوهای تعیین‌شده عکس اول، در عکس‌های بعدی و استخراج مختصات طول و عرض آنها است. ترتیب کار تابع همبستگی تصاویر دیجیتال برای ردگیری موقعیت الگوی عکس اول در عکس‌های

۳- روش تحقیق

۳-۱- مواد و آماده‌سازی نمونه‌ها

در این پژوهش، از نمونه‌های کامپوزیت شیشه/اپوکسی، با لایه چین $[0/90]$ استفاده شده است که مشخصات مربوط به هر نمونه در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱) اطلاعات ابعاد نمونه

داده‌ها	مقدار (میلی‌متر)
طول	۱۰۰
عرض	۲۰
ضخامت	۴
طول تب	۲۰
ضخامت تب	۲
طول ناحیه بازرسی	۶۰
عرض ناحیه بازرسی	۲۰
ضخامت هر لایه	۰/۳۳

برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی از روش تزریق در خلأ استفاده شد. از اپوکسی EPR1080 و هاردنر EPH1080 به‌عنوان ماده زمینه و پارچه الیاف شیشه COLAN AF251 به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده شده است. پس از اتمام فرآیند ساخت، نمونه‌ها به مدت یک هفته در هوای آزاد و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار داده شده است. از روش آلتراسونیک سی‌اسکن برای بررسی کیفیت لایه‌ها استفاده شده است. درصد حجمی الیاف برای هر نمونه ۶۰±۳٪ و ضخامت میانگین آن‌ها نیز ۴ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. پس از آماده‌سازی صفحات کامپوزیتی، نمونه‌های دارای سوراخ کور با قطر ۱۰ میلی‌متر به عمق‌های ۰/۵، ۱ و ۱/۵ میلی‌متر را با استفاده از دستگاه واترجت و بر اساس ابعاد استاندارد برش داده شده‌اند. سطح دیگر نمونه‌ها که کاملاً صاف هستند، توسط اسپری رنگ‌آمیزی و الگوی تصادفی از خال‌های سیاه در زمینه سفید ایجاد شده است.

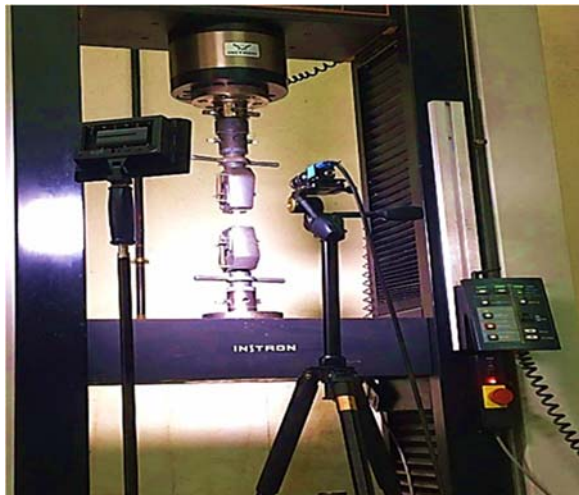
۳-۲- روش انجام آزمایش

دوربین در موقعیت مناسبی در روبروی نمونه و محدوده اندازه‌گیری قرار داده شده است. بار کششی با نرخ جابجایی ثابت ۲ میلی‌متر بر دقیقه در دمای ۲۴ درجه سانتی‌گراد اعمال شده است. تصویربرداری توسط DIC قبل از شروع بارگذاری و حین بارگذاری برای هر نمونه انجام شده است. تصاویر در فرکانس یک فریم بر ثانیه ضبط شده است؛ همچنین مقدار نیرو و جابجایی به‌طور پیوسته حین آزمایش اندازه‌گیری و ثبت شده است. مقدار بارگذاری در این آزمون غیرمخرب، برای هر سه نمونه موجود در ۳۰ و ۴۰٪ بار مورد نیاز شکست نمونه بدون سوراخ کور انجام شده است.

۳-۳- تجهیزات آزمایش

یک دستگاه تست کشش هیدرولیکی اینسترون R5500 با ظرفیت بار ۲ تن و با قابلیت تنظیم سرعت بارگذاری بین ۵۰۰-۱/۰ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است. از یک سیستم دوبعدی

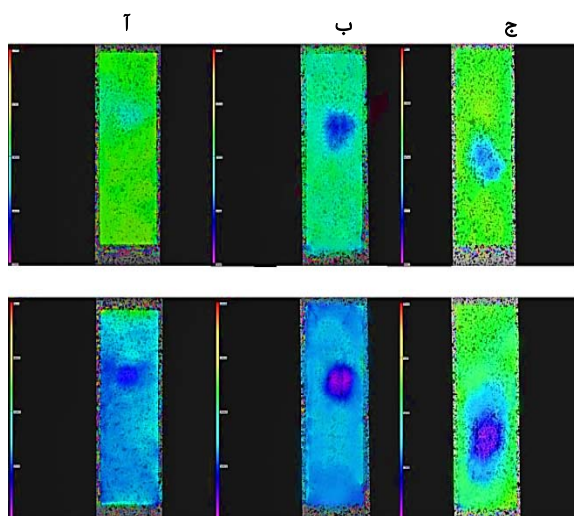
با یک دوربین کالیبره‌شده CCD با رزولوشن ۵ مگاپیکسل در تولید تصاویر DIC استفاده شده است. همچنین برای کالیبره‌کردن دوربین و ثبت تصاویر از نرم‌افزار ای‌سی‌کچر استفاده شده است. از یک منبع نور برای روشنایی و کاهش نویزهای نوری نسبت به محیط اطراف استفاده شده است. شکل ۲ تجهیزات مورد استفاده در آزمایش را حین انجام تست نشان می‌دهد.



شکل ۲) نمای کلی تجهیزات آزمایش

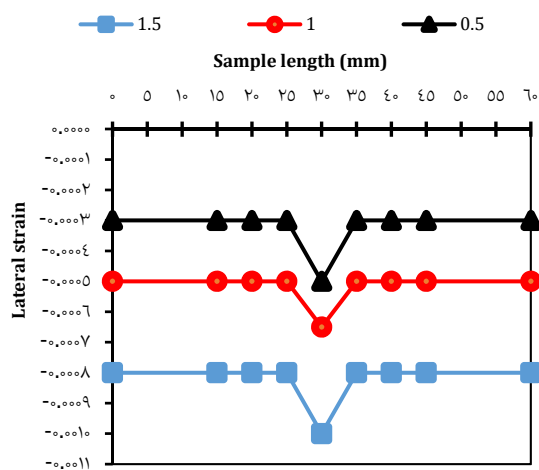
۴- تحلیل نتایج و بحث

با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال، امکان مشاهده کانتور کرنش در سطح نمونه تحت بارگذاری وجود دارد. بنابراین از این روش برای مشاهده کانتور کرنش در نمونه‌های کامپوزیتی دارای سوراخ کور با عمق‌های متفاوت استفاده شده است. در شکل ۳، کانتور کرنش عرضی برای نمونه‌های دارای سوراخ کور با عمق‌های مختلف در ۳۰ و ۴۰٪ بار قابل تحمل برای نمونه بدون سوراخ نشان داده شده است.

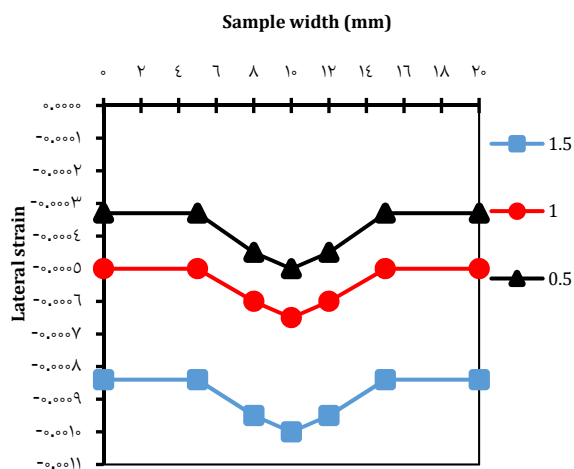


شکل ۳) کانتور کرنش جانبی برای نمونه‌هایی با عمق سوراخ کور؛ (آ) ۰/۵ میلی‌متر، (ب) ۱ میلی‌متر و (ج) ۱/۵ میلی‌متر؛ شکل بالا در ۳۰٪ بار و شکل پایین در ۴۰٪ بار مورد نیاز شکست نمونه بدون سوراخ

سوراخ کور دیده شده است که دلیل آن مربوط به جدایش الیاف از ماتریس، ترک ماتریسی و شکست الیاف است. همچنین با دورتر شدن ناحیه خرابی به سطح مورد بازرسی در هر نمونه تمرکز کرنش کمتری ملاحظه شده است، به گونه‌ای که در نمونه دارای سوراخ کور با عمق ۵/۰ میلی‌متر که خرابی در فاصله دورتری از سطح قرار گرفته بود، کمترین میزان تمرکز کرنش و بیشترین میزان خطا در اندازه‌گیری قطر سوراخ کور مشاهده شده است. در ادامه برای بیان شدت تمرکز کرنش در ناحیه سوراخ کور، نسبت کرنش ماکزیمم به کرنش متوسط در سطح هر نمونه به عنوان ضریب تمرکز کرنش در ۴۰٪ بار قابل تحمل برای نمونه سالم اندازه‌گیری شده است و نتایج حاصل از آن در نمودار ۴ نشان داده شده است. با توجه به نمودار ۴، مشاهده می‌شود که با افزایش عمق سوراخ کور، مقادیر نسبت کرنش ماکزیمم به کرنش متوسط در کل سطح نمونه به دلیل نزدیک شدن ناحیه خرابی به سطح مورد بازرسی افزایش یافته است.



نمودار ۱) مقادیر کرنش جانبی- طولی نمونه برای نمونه‌های با عمق سوراخ کور متفاوت در ۴۰٪ بار مورد نیاز برای شکست نمونه بدون سوراخ



نمودار ۲) مقادیر کرنش جانبی- عرضی نمونه برای نمونه‌های با عمق سوراخ کور متفاوت در ۴۰٪ بار مورد نیاز برای شکست نمونه بدون سوراخ

۴-۱- ارزیابی سوراخ کور در راستای طول و عرض نمونه

همان‌طور که از کانتورهای به‌دست‌آمده از روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال مشخص است، مقادیر کرنش جانبی به‌طور یکنواخت روی سطح نمونه توزیع نشده است. کرنش جانبی برای هر نمونه در یک ناحیه مشخص متمرکز شده است که به‌طور قابل ملاحظه‌ای با مکان سوراخ کور ارتباط دارد. این ناحیه از نظر شکل، موقعیت و مساحت، به‌طور قابل توجهی با شکل، موقعیت و مساحت سوراخ کور موجود در هر نمونه ارتباط بسیار نزدیکی دارد. در نمودار ۱، مقادیر کرنش جانبی را در امتداد یک خط مستقیم در راستای طول نمونه در ۴۰٪ بار مورد نیاز برای شکست نمونه سالم نشان داده شده است. در ادامه طول ناحیه تمرکز کرنش به‌دست‌آمده از روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال، اندازه‌گیری و سپس با اندازه واقعی مقایسه شده است. طول ناحیه تمرکز کرنش با اندازه واقعی که همان قطر سوراخ است، در ۴۰٪ بار مورد نیاز برای شکست نمونه بدون سوراخ بیشترین تطابق را داشته است. برای بررسی دقیق‌تر ناحیه تمرکز کرنش در کانتورهای به‌دست‌آمده از روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال، مقادیر کرنش جانبی را در امتداد یک خط مستقیم در راستای عرض نمونه در ۴۰٪ بار مورد نیاز برای شکست نمونه بدون سوراخ، برای هر سه نمونه موجود استخراج شده است.

در نمودار ۲، مقادیر کرنش جانبی در امتداد یک خط مستقیم در راستای عرض برای نمونه‌های دارای سوراخ کور با عمق‌های مختلف نشان داده شده است که دارای قطر نسبتاً یکسانی نسبت به قطر اندازه‌گیری شده از تحلیل در راستای طول نمونه است.

۴-۲- بررسی اثر مقدار بارگذاری بر قابلیت شناسایی سوراخ کور

مقدار بار مورد نیاز برای شکست نمونه کاملاً سالم و بدون پارگی الیاف، مطابق با آزمون کشش، ۲۰۰۰ نیوتن اندازه‌گیری شده است. به‌صورت جداگانه برای هر نمونه، مقدار بارگذاری در ۲ مقدار بار متفاوت f_1 و f_2 به‌صورت درصدی از بار مورد نیاز برای شکست نمونه سالم انجام شده است. بنابراین برای f_1 مقداری برابر با ۳۶۰۰ نیوتن و برای f_2 مقداری برابر با ۴۸۰۰ نیوتن محاسبه شده است که به‌ترتیب ۳۰٪ و ۴۰٪ بار مورد نیاز برای شکست نمونه بدون سوراخ کور هستند. در نمودار ۳، تغییرات کرنش جانبی در راستای عرض برای نمونه دارای سوراخ کور با عمق ۱ میلی‌متر تحت بارگذاری‌های متفاوت نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش میزان بارگذاری از ۳۰٪ به ۴۰٪ بار مورد نیاز شکست نمونه بدون سوراخ کور، مقدار عددی کرنش جانبی و همچنین اندازه ناحیه تمرکز کرنش در مجاورت سوراخ افزایش یافته است و موجب تمایز بیشتر آن ناحیه نسبت به دیگر نقاط در کانتور کرنش به‌دست‌آمده از سطح نمونه شده است. همچنین با افزایش بار اندازه سوراخ کور در کانتورهای کرنش به‌دست‌آمده به اندازه واقعی آن نزدیک‌تر شده است.

۴-۳- بررسی اثر عمق بر قابلیت شناسایی سوراخ کور

با افزایش عمق سوراخ کور تمرکز کرنش جانبی بیشتری در ناحیه

سوراخ در شناسایی بهتر و دقیق‌تر خرابی از اهمیت زیادی برخوردار است؛ به‌صورتی که برای کمی‌سازی فرآیند شناسایی سوراخ کور باید هر دو پارامتر ذکرشده، مورد توجه قرار گیرند. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش و با توجه به تطابق قابل قبول نتایج حاصل از روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال با ویژگی‌های مربوط به هر نمونه، می‌توان این روش را به‌عنوان یک روش کارآمد در تشخیص و ارزیابی خرابی در سازه‌های کامپوزیتی استفاده نمود. منطقه آسیب‌دیده ناشی از سوراخ کور در نمونه‌های کامپوزیتی به روش همبستگی تصاویر دیجیتالی با موفقیت شناسایی شد و نتایج حاصل از تصاویر به آسانی قابل درک است. خلاصه نتایج به‌دست‌آمده به شرح زیر است:

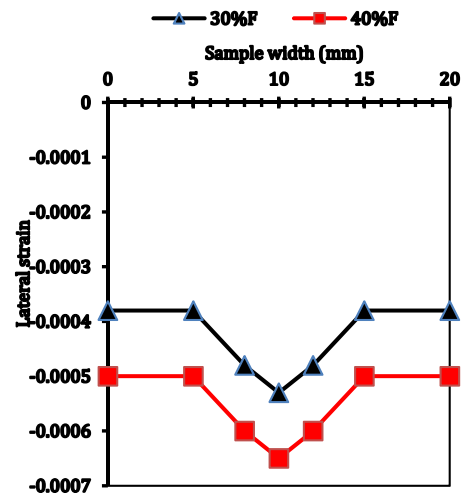
- با افزایش میزان بارگذاری از ۳۰ به ۴۰٪ بار مورد نیاز شکست نمونه بدون سوراخ کور، مقدار عددی کرنش جانبی و همچنین اندازه ناحیه تمرکز کرنش در مجاورت سوراخ افزایش یافته است و موجب تمایز بیشتر آن ناحیه نسبت به دیگر نقاط در کانتور کرنش به‌دست‌آمده از سطح نمونه شده است. همچنین با افزایش بار اندازه سوراخ کور در کانتورهای کرنش به‌دست‌آمده به اندازه واقعی آن نزدیک‌تر شده است.
- با افزایش عمق سوراخ کور، مقادیر نسبت کرنش ماکزیمم به کرنش متوسط در کل سطح نمونه به‌دلیل نزدیک‌شدن ناحیه خرابی به سطح مورد بازرسی افزایش یافته است. بنابراین نمونه دارای سوراخ کور با عمق ۱/۵ میلی‌متر مقدار کرنش بیشتری را در ناحیه وجود خرابی نسبت به دو نمونه دیگر به خود اختصاص داده است.
- طول ناحیه تمرکز کرنش به‌دست‌آمده از روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال، اندازه‌گیری و سپس با اندازه واقعی مقایسه شده است. طول ناحیه تمرکز کرنش با اندازه واقعی (که همان قطر سوراخ است) در ۴۰٪ بار مورد نیاز برای شکست نمونه بدون سوراخ بیشترین تطابق را داشته است.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند، از مسئولان و کارشناسان مرکز پژوهش کاربردی جوش و آزمون‌های غیرمخرب دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه تهران برای در اختیار قراردادن تجهیزات این پژوهش، کمال تشکر و قدردانی را بنمایند.

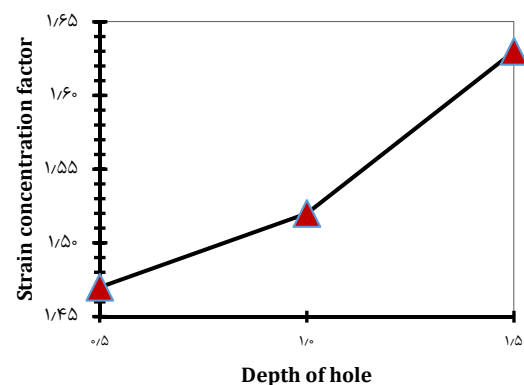
تاییدیه اخلاقی: گواهی می‌شود که در نگارش این مقاله کلیه اصول اخلاق در مهندسی رعایت شده است.

تعارض منافع: گواهی می‌شود که در نگارش این مقاله هیچ تعارضی در منافع نویسندگان وجود ندارد.

سهم نویسندگان: محمدجواد پاکروان (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ محمدرضا فراهانی (نویسنده دوم)، نگارنده مقدمه/روش‌شناس/پژوهشگر کمکی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪).



نمودار ۳) تغییرات کرنش جانبی در راستای عرض برای نمونه دارای سوراخ کور با عمق میلی‌متر تحت بارگذاری‌های متفاوت



نمودار ۴) نسبت کرنش ماکزیمم به کرنش متوسط در نمونه‌های با عمق سوراخ کور مختلف در ۴۰٪ بار مورد نیاز برای شکست نمونه بدون سوراخ

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به تست غیرمخرب روی ساختار کامپوزیتی دارای سوراخ کور با عمق‌های مختلف به روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال پرداخته شده است. این روش با اندازه‌گیری کانتور کرنش در سطح نمونه تحت بارگذاری که قادر به شناسایی سوراخ کور و رفتار آن تحت شرایط بارگذاری است. در این روش نیازی به تماس فیزیکی با نمونه تحت آزمایش نیست که خود موجب افزایش درجه آزادی آزمون می‌شود. روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتال قادر است که رفتار ماده را به‌صورت دقیق آشکار سازد که پیش از این تنها با کمک روش‌های مدل‌سازی عددی و برخی از روش‌های پرهزینه ممکن بود. از دیگر مزیت‌های این روش می‌توان به هزینه آماده‌سازی و نگهداری پایین اشاره کرد و به‌طور کلی در مقابل دیگر روش‌های آزمون غیرمخرب از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه است. وجود سوراخ کور باعث ایجاد تمرکز کرنش در نمونه تحت بارگذاری شده است و این نتیجه از روی کانتور کرنش جانبی در سطح نمونه مشخص شده است و به شناسایی موقعیت، شکل و اندازه عیب در نمونه منجر شده است. دو پارامتر نیرو و عمق

- nano composite laminates. Journal of Mechanical Engineering and Sciences. 2018;12(4):4329-4355.
- 7- Sabokrouh M, Farahani M. Experimental study of the residual stresses in girth weld of natural gas transmission pipeline. Journal of Applied and Computational Mechanics. 2019;5(2):199-206.
- 8- Sam-Daliri O, Faller LM, Farahani M, Roshanghias A, Oberlercher H, Mitterer T, et al. MWCNT-epoxy nanocomposite sensors for structural health monitoring. Electronics. 2018;7(8):143.
- 9- Venkatachalam S, Khaja Mohiddin SM, Murthy H. Determination of damage evolution in CFRP subjected to cyclic loading using DIC. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. 2018;41(6):1412-1425.
- 10- Devivier C, Thompson D, Pierron F, Wisnom MR. Correlation between full-field measurements and numerical simulation results for multiple delamination composite specimens in bending. Applied Mechanics and Materials. 2010;24-25:109-114.
- 11- Devivier C, Pierron F, Wisnom MR. Damage detection in composite materials using deflectometry, a full-field slope measurement technique. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2012;43(10):1650-1666.
- 12- del Rey Castillo E, Allen T, Henry R, Griffith M, Ingham J. Digital image correlation(DIC) for measurement of strains and displacements in coarse, low volume-fraction FRP composites used in civilinfrastructure. Composite Structures. 2019;212:43-57.
- 13- Shrama K, Al-Jumaili S, Pullin R, Clarke A, Evans S. On the use of acoustic emission and digital image correlation for welded joints damage characterization. Journal of Applied and Computational Mechanics. 2019;5(2):381-389.
- 14- Laurin F, Charrier JS, L  v  que D, Maire JF, Mavel A, Nu  ez P. Determination of the properties of composite materials thanks to digital image correlation measurements. Procedia IUTAM. 2012;4:106-115.
- 15- Caminero MA, Lopez-Pedrosa M, Pinna C, Soutis C. Damage monitoring and analysis of composite laminates with an open hole and adhesively bonded repairs using digital image correlation. Composites Part B: Engineering. 2013;53:76-91.
- 16- Khechai A, Tati A, Guerira B, Guettala A, Mohite PM. Strength degradation and stress analysis of composite plates with circular, square and rectangular notches using digital image correlation. Composite Structures. 2018;185:699-715.
- 17- Sabato A, Niezrecki C. Feasibility of digital image correlation for railroad tie inspection and ballast support assessment. Measurement. 2017;103:93-105.
- 18- Szeb  nyi G, Hliva V. Detection of delamination in polymer composites by digital image correlation-experimental test. Polymers. 2019;11(3):523.
- 19- Shahmirzaloo A, Farahani M. Determination of local constitutive properties of aluminum using digital image correlation: A comparative study between uniform stress and virtual fields. International Journal of Advanced Design & Manufacturing Technology. 2019;12(1):67-75.
- 20- Rahmatabadi D, Shahmirzaloo A, Hashemi R, Farahani M. Using digital image correlation for characterizing the elastic and plastic parameters of ultrafine-grained Al 1050 strips fabricated via accumulative roll bonding process. Materials Research Express. 2019;6(8).

منابع مالی: هزینه‌های این پروژه به‌صورت شخصی تأمین شده است.

۶- فهرست علائم

ماتریس نرمی	S
مدول یانگ	E
مدول برشی	G
ماتریس سفتی محوری	[A]
ماتریس جفت شونده	[B]
ماتریس سفتی خمشی	[D]
ماتریس تبدیل	[T]
ماتریس روتیز	[R]
ماتریس سفتی در مختصات محلی	[Q]
ارتفاع لایه از تار خنثی	Z
ماتریس نیروهای مجازی	[N]
ماتریس گشتاورهای مجازی	[M]
کرنش پیچشی	K
ضخامت لایه	t
تعداد لایه‌ها	N
علائم یونانی	
مدول برشی	v
ضریب انبساط حرارتی	α
تنش عمودی	σ
تنش برشی	τ
کرنش عمودی	ε
کرنش برشی	γ

منابع

- 1- Rahmatabadi D, Shahmirzaloo A, Farahani MR, Hashemi R. Evaluation of the elastic and plastic properties of aluminum sheet produced by climbing bonding process by digital image correlation method. Modares Mechanical Engineering. 2019;19(2):505-513. [Persian]
- 2- Akbari D, Soltani N, Farahani M. Numerical and experimental investigation of defect detection in polymer materials by means of digital shearography with thermal loading. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2013;227(3):430-442.
- 3- Rahmatabadi D, Shahmirzaloo A, Farahani MR, Tayyebi M, Hashemi R. Characterizing the elastic and plastic properties of the multilayered Al/Brass composite produced by ARB using DIC. Materials Science and Engineering: A. 2019;753:70-78.
- 4- Sam-Daliri O, Faller LM, Farahani M, Roshanghias A, Arae A, Baniassadi M, et al. Impedance analysis for condition monitoring of single lap CNT-epoxy adhesive joint. International Journal of Adhesion and Adhesives. 2019;88:59-65.
- 5- Ghabezi P, Farahani M, Shahmirzaloo A, Ghorbani H, Harrison NM. Defect evaluation of the honeycomb structures formed during the drilling process. International Journal of Damage Mechanics. 2019;29(3):454-466.
- 6- Ghabezi P, Farahani M. Characterization of cohesive model and bridging laws in mode I and II fracture in